International Science Journal of Engineering & Agriculture
2022; 1(3): 1-18
https://isg-journal.com/international-science-journal-of-engineering-agriculture/
doi: 10.46299/j.isjea.20220103.1
ISSN: 2720-6319

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ СУЗІР'Я МАЛИХ СУПУТНИКІВ СУПУТНИКОВОЇ МЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ

Володимир Сайко[1], Теодор Наритник[2]
[1]Факультет інформаційних технологій, кафедра прикладних інформаційних систем, Київський національний університет імені Тараса Шевченка , вулиця Володимирська, 60, Київ, 01033, Україна
ORCID 0000-0002-3059-6787
[2]Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук, проспект Леся Курбаса, 2Б, 410 офіс; Київ, 03148, Україна
ORCID 0000-0002-4118-0226
Електронна адреса: vgsaiko@gmail.com; t.narytnyk@ukr.net

Для цитування цієї статті:
Володимир Сайко, Теодор Наритник. Метод забезпечення енергозбереження сузір'я малих супутників супутникової мережі з розподіленою архітектурою. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 1, No. 3, 2022, pp. 1-18. doi:10.46299/j.isjea.20220103.1.
Надійшла до редакції: 02 червня 2022 р.; **Схвалено:** 09 червня 2022 р.;
Опубліковано: 01 серпня 2022 р.

Анотація: В роботі розв'язано науково-практичне завдання розроблення моделей для інтеграції технології бездротової передачі інформації та енергії у інфраструктуру супутникової мережі на базі малих супутників з використанням алгоритмів та засобів штучного інтелекту в умовах високої динаміки зміни ймовірнісно-часових характеристик інформаційних потоків та суперечливих вимог до якості обслуговування. Запропоновано концептуальну модель інтеграції технології бездротової передачі інформації та енергії у інфраструктуру супутникової мережі на базі малих супутників, яка забезпечує необхідну інфраструктуру для підтримки розроблених інтелектуальних алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками. Розроблено моделі та засоби для аналізу і управління ресурсами в низькоорбітальній супутниковій системи (НОСС) на базі розподіленого супутника (РС) для передачі інформації та енергії: модель радіоканалу зв'язку з телекомунікаційною системою на основі висотної аероплатформи (ТСВА); віртуальну модель для аналізу широкосмугових радіоканалів з використанням трасування променів при багатопроменевому поширенні радіохвиль; спосіб та алгоритми підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС з використання штучного інтелекту; структурну схему технічної реалізації запропонованого способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС. Запропоновано алгоритм збору даних, що передбачає відстежування стану блоків системи підвищення

енергозбереження в Cub-SAT НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль для раціонального збору даних із використанням зміни значень, як метрик евклідових відстаней, так і метрик функціональних технічних параметрів, по відношенню до кількості кластерів. Новизна даного підходу полягає у відмінності від класичної реалізації тим, що введені метрики співвідношення сигнал/шум та затримка компонентів багатопроменевого сигналу, замість метрики Евклідової відстані, що дає змогу враховувати просторові характеристики поширення сигналу в процесі само оптимізації розробленої приймальної структури та відповідно підвищити її технічну ефективність.

Ключові слова: бездротова передача інформації та енергії, технології енергозбереження, космічні малі апарати, розподілений супутник, кубсат.

---

1. Введення

Відповідно до довготермінових прогнозів маркетингових компаній у найближчі 10 років у секторі супутникових інформаційних систем, невеликі супутники та космічні низькі системи з цими супутниками стають двигунами цього розвитку [1-5]. Окреме місце займають супутники класу Cub-SAT. Космічні апарати цього класу пройшли шлях від демонстрації та навчання космічних апаратів до космічних апаратів, призначених для наукових досліджень, технологічних програм, забезпечення комунікації та широкосмугового доступу, віддаленого зондування Землі, як незалежно, так і в рамках низькоорбітальних інформаційних систем. Позитивними факторами, що сприяють зростаючому інтересу до космічних апаратів класу Cub-SAT для операторів та клієнтів космічних апаратів та для виробників обладнання, корисного навантаження та платформ куба-сатів, є їх дешевина та мінімальний час виробництва. Проблемою все ще залишається тривалий час для очікування запуску Cub-SAT на робочу орбіту. Але ракети-носії надмалого класу планується вирішать цю проблему у найближчий час. Негативний фактор, який стримує розробку програм та проектів, що використовують Cub-SAT, є обмежені можливості платформ цього класу щодо розміщення корисного навантаження та особливо забезпечення його енергопостачання. Через низку фізичних факторів, таких як відстань від орбіти космічного апарату до поверхні Землі, частина енергетичного бюджету радіолінії Cub-SATів використовується для роботи командно-телеметричної радіолінії та радіоліній передачі корисної інформації. Тому, для підвищити ефективність енергопостачання Cub-SATів, представляє інтерес дослідницькі рішення для накопичення енергії з навколишнього середовища. З цієї точки зору, слід зазначити, що на даний момент тенденція енергопостачання для мобільних вузлів також переходить до пошуку альтернативних джерел, а не на використання обмеженого живлення, що забезпечується типовими батареями. Хоча деякі дослідження з управління енергією все ще орієнтовані на ефективне використання існуючої моделі на основі акумулятора, для відновлення енергії, зокрема у вигляді накопичення енергії з навколишнього середовища для продовження терміну експлуатації мережі.

2. Сучасний стан проблеми і шляхи її вирішення

2.1. Аналіз останніх досліджень і вирішення

Останнім часом у декількох дослідженнях було вивчено можливість використання природних джерел для збирання енергії у мережах зв'язку і підвищення енергоефективності з допомогою просування зелених технологій. Але збір енергії від природних джерел виявився не дуже ефективним, в-першу чергу, через нерегулярності і непередбачуваності навколишніх джерел. Щоб подолати вищезгадані обмеження, в бездротовий зв'язок було впроваджено збір радіочастотної енергії, що створило необхідність розробки технології, яка може одночасно передавати кінцевим пристроям як інформацію, так і енергію. Для цього було вперше запропоновано концепцію одночасної бездротової передачі інформації та енергії (ОБПІМ) [6, 7]. У зв'язку з розробками систем 5G був проведений теоретичний аналіз, практична реалізація та можливі застосування бездротової передачі енергії (БПЕ) та ОБПІМ [8,9]. Проте ефективне використання енергії, зібраної при правильному розподілі потужності, все ще залишається відкритою проблемою у мережах бездротового зв'язку з підтримкою ОБПІМ.

В [10] пропонується схема накопичення енергії з навколишнього середовища для вирішення проблеми просторово-часових змін енергії з навколишнього середовища. Запропоновано змінити існуючі методи балансування навантаження, вибір провідного вузла для кластеризації та спілкування зі збереженням енергії.

Дослідник М. Рахімі [11] запропонував модель на основі накопичення енергії за умови, що мережа містить мобільні вузли. Вони можуть вільно рухатися по мережі в пошуках енергії. Як тільки ці вузли заряджаються достатньою енергією, вони потім використовуються для зарядки вузлів з критичною низькою енергією. Мобільні вузли називаються виробниками енергії в припущенні, що їх можна зарядити з сонячної енергії. Інша сфера вивчення вузлів з живленням з навколишнього середовища - це подальше підвищення ефективності за рахунок введення алгоритмів управління енергією для зменшення споживання енергії.

Слід також зазначити, що більшість дослідників сьогодні зосереджують свою увагу в основному на сонячній енергії, і в багатьох роботах, пов'язаних із накопиченням сонячної енергії, і які можна знайти в літературі, цей напрямок вважається найбільш перспективним способом забезпечення альтернативного енергія.

З точки зору авторів статті, особливий інтерес у вирішенні проблеми з енергопостачанням Cub-SATів мають комплексні рішення та методи використання БПЕ та ОБПІМ [8,9]. Варто зазначити, що інтеграція традиційних механізмів збору енергії з ТСВА, таких як сонячна енергія, вітер тощо, для підвищення енергоефективності може призвести до значного збільшення загальної ваги Cub-SATів через додаткову вагу апаратних засобів модулів для збору енергії. Це безпосередньо впливає на характеристики мобільності Cub-SATів, обмежуючи маневреність та термін служби. Крім того, з огляду на непередбачуваний характер

природних джерел енергії немає можливості гарантувати очікувану енергоефективність під час експлуатації Cub-SATів. Таким чином, механізм збору радіочастотної енергії є найкращим варіантом та забезпечує сучасне вирішення проблеми розрядки Cub-SATів.

В [8] пропонується інтегрована система збору енергії для розподілу ресурсів та оптимізацію бездротової системи, в якій ТСВА виступає як радіовузол ретрансляції, тобто представлена система збору енергії на базі використання протоколів БПЕ, ОБПІМ та обробки компонентів багатопроменевого сигналу (ОКБС) для забезпечення функціонування телекомунікаційної системи. Потреби в джерелі живлення для передачі інформації повністю надаються виключно з вибраної радіолінії БПЕ та радіочастотного сигналу, що передається з джерела через ОБПІМ, що робить ТСВА енергонезалежною. Крім того, ОКБС в ТСВА використовується як джерело для збору енергії через використання завад.

Недоліком такого рішення є те, що автори в розробці цієї моделі не враховували, по-перше, особливості сучасних моделей багатопроменевого розповсюдження радіохвиль при використанні ТСВА і, по-друге, режими діаграмоутворення при використанні у мережах 5G алгоритмів адаптивного формування променів діаграм направленості антенних систем (адаптивного діаграмоутворення).

Крім того, недоліком запропонованого підходу обробки сигналів при передачі інформації та енергії є те, що при проведенні процедури пошуку сигналів променів не враховується вплив компонент багатопроменевого сигналу друг на друга. Внаслідок цього зростає ймовірність помилкового виявлення сигналів променів. Крім того, не здійснюється оптимізація числа сигналів променів, які використовуються для отримання м'яких рішень про інформаційні символи та для збору енергії на основі ОКБС, що призводить до завищення вимог до апаратної реалізації, без збільшення якості інформації, що виділяється.

Слід також відмітити, що розроблені моделі [8] ефективно проявляють себе при роботі із статичними потоками. Для вирішення більш складніших задач на сьогоднішній день використовуються алгоритми на базі машинного навчання, зокрема нейронних мереж. Такі алгоритми дозволяють визначити нетипові поведінки трафіку, короткотривалі пікові навантаження, а також врахувати необмежену кількість мережевих параметрів для оптимізації мережі.

2.2. Постановка завдання

В сучасних умовах розвитку мереж 5G мобільного зв'язку виникає нова науково-технічна задача – інтеграція технології бездротової передачі інформації та енергії у мережну інфраструктуру НОСС на базі РС для забезпечення процесу енергозбереження її засобів функціонування при використанні терагерцового діапазонів хвиль.

Розв'язок даної задачі потребує створення нової концепції побудови НОСС на базі РС, яка інтегрує методи і засоби штучного інтелекту (ШІ) із інфраструктурою

технології бездротової передачі інформації та енергії, що дасть змогу поєднати переваги використання Cub-SATів для моделей побудови супутникової мережної інфраструктури, усуваючи при цьому їх характерні недоліки та обмеження.

Мета даної роботи полягає у наступному. Серед методів збору радіочастотної енергії ОБПІМ є недорогим та може потенційно підвищити спектральну ефективність для НОСС на базі РС. Компроміс між швидкістю передачі та кількістю зібраної енергії стає важливим фактором при оцінці продуктивності інтегрованої системи зв'язку. Тому ефективний розподіл ресурсів в інтегрованій мережі зв'язку мають першорядне значення для IoT мереж зв'язку та НОСС на базі РС з використанням Cub-SATів та підтримкою ОБПІМ.

Щоб заповнити цю прогалину в даних дослідженнях удосконалено розроблену модель збирання енергії, що складається із систем БПЕ, ОБПІМ та збирання енергії від багатопроменевих сигналів, і інтегрували її у мережну інфраструктуру НОСС на базі РС з використанням засобів ШІ, яка має більш високу продуктивність, ніж існуючі моделі збирання енергії. Запропоновано нову структуру часових блоків для впровадження запропонованої єдиної моделі збирання енергії для забезпечення енергозбереження Cub-SATів НОСС на базі РС.

3. Моделі та засоби для аналізу і управління ресурсами в НОСС на базі РС для передачі інформації та енергії

3.1. Модель радіоканалу зв'язку з ТСВА

Останнім часом у різних галузях народного господарства широке поширення набуває використання систем UAS (Unmanned Aerial Systems) на основі ТСВА та дронів. Для забезпечення надійного зв'язку при керуванні та передачі телеметрії CNPC (Control and Nonpayload Communication), а також організації бездротової передачі даних у радіолінії між наземним пунктом (НП) та повітряним сегментом у різних умовах функціонування велике значення має вибір та обґрунтування моделей радіоканалу зв'язки із ТСВА; у зарубіжних джерелах дані моделі відносять до класу моделей Земля-повітря AG (Air-Ground). Моделі радіоканалу зв'язку з ТСВА проаналізовано у [12,13] за матеріалами експериментальних робіт [14-22]. Історично для радіоканалів типу Земля-повітря та повітря-Земля використовували модель вільного простору, а також двопроменеву модель, що враховує крім компоненти прямої видимості LOS, додатковий промінь, відбитий від Землі. Для прогнозу умов розповсюдження хвиль (РРХ) у радіоканалі зв'язку з ТСВА даних припущень може виявитися недостатньо, тому що ТСВА можуть рухатися на набагато менших порівняно з літаками висотах і на менші відстані, а також здійснювати маневри, не властиві авіації, що пілотується. Також традиційні моделі AG призначені для вузькосмугових каналів та специфічних місць розміщення НП [18]. Існуючі широкополосні моделі радіоканалу зв'язку міліметрового та терагерцового діапазонів хвиль з ТСВА мають надзвичайно великий розкид значень середньоквадратичного

відхилення розширення затримки [19], що говорить про істотну відмінність умов РРХ у різних місцях розміщення антен НП, наприклад, над морем, гори та пагорби, у передмісті та місті. Для радіоканалів AG, де основною є компонента LOS [17], інтервал стаціонарності SD (Stationarity Distance), що безпосередньо впливає на період замирань і просторову кореляцію компонентів, що замирають [19], повинен бути більшим, ніж у радіоканалах наземних систем рухомого зв'язку [20]. Результати аналізу існуючих моделей радіоканалу зв'язку типу Земля-повітря та повітря-Земля [14-22] підтвердили необхідність нового експериментального дослідження для сценаріїв з ТСВА. Такі дослідження були проведені під егідою NASA (National Aeronautics and Space Administration, Національне управління з аеронавтики та дослідження космічного простору, США).

Підсумковий аналіз моделей радіоканалу зв'язку з ТСВА дозволяє зробити наступні висновки [14-22]:

a) втрати РРХ задовільно описуються двопроменевою моделлю; втрати в C-діапазоні більше на ~5-15 дБ, ніж у L-діапазоні внаслідок більш гладкої поверхні, що відбиває, на більшій довжині хвилі;

b) у радіоканалі присутні прямий та відбитий промені; для сценаріїв у пагорбах/горах та місті/передмісті крім двох променів можуть додатково епізодично виявлятися до 7 багатопроменевих каналів, які описуються ймовірно-часовими характеристиками залежно від відстані між НП та ТСВА; їх прояв можна з якимось ступенем вважати несуттєвим;

c) середньоквадратичне розширення затримки RMS-DS лежить у межах від 10 нс, що відповідає різниці ходу променів 30 м, проте може досягати значень близько 4 мкс;

d) статистика вимірювань показала наявність сильної компоненти LOS з K-фактором 12 дБ у L-діапазоні та 25–30 дБ у C-діапазоні; менші значення K-фактору в L-діапазоні пояснюються більш істотною відбитою компонентою внаслідок більшої довжини хвилі.

Таким чином, для задач енергозбереження при передачі інформації багатопроменевість можна трактувати як дискретну, що включає компоненту променя прямої видимості та компоненту відображеного сигналу, яку потрібно враховувати в умовах нерівномірного рельєфу.

3.2. Віртуальна модель для аналізу широкосмугових радіоканалів з використанням трасування променів при багатопроменевому поширенні радіохвиль

У зв'язку з наведеними факторами для подальших досліджень була розроблена імітаційна віртуальна модель середовища з міською фізичною інфраструктурою та багатопроменевим поширенням хвиль. Варто зазначити, що існуючі геометричні методи проектування, які переважно використовують метрику Евклідової відстані для розрахунку оптимального розташування базових станцій, не можуть забезпечити адекватність моделювання та належну ефективність синтезованої топологічної

структури. З метою наближення сценарію моделювання до реальних умов функціонування мережі мобільного зв’язку в умовах щільної міської забудови запропонований спосіб використовує модель трасування променів, для імітації багаторазових відбиттів сигналу в каналах NLOS (Non Line of Sight). Для цього було розроблено імітаційну модель територіальної зони покриття, яка є точною копією сегменту району Гонконгу (рис. 1).

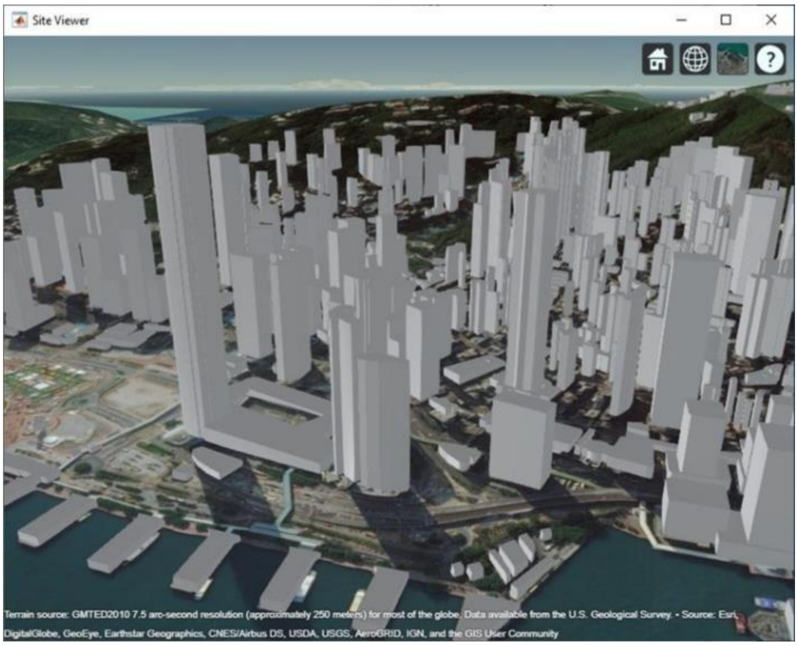


Рисунок 1. Просторова модель досліджуваної зони покриття.

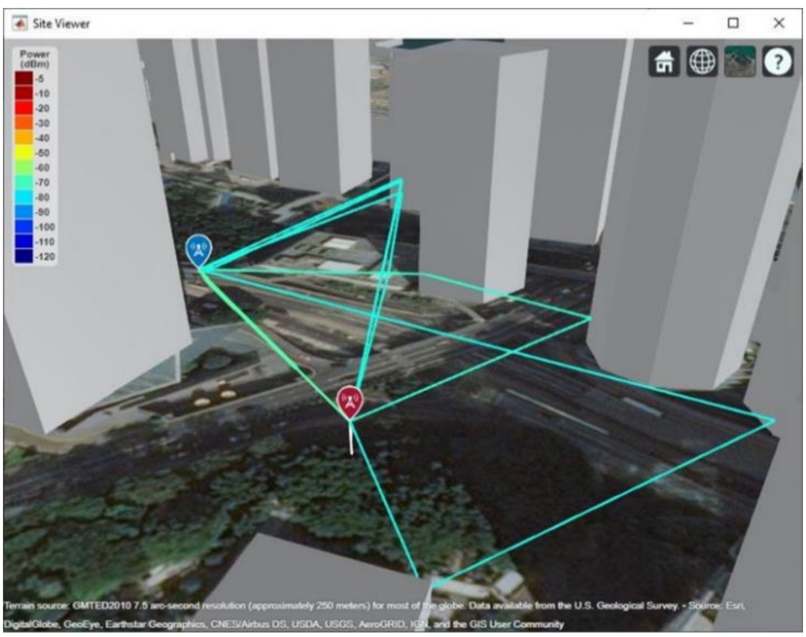


Рисунок 2. Моделювання каналів непрямої видимості між базовою станцією та абонентським пристроєм

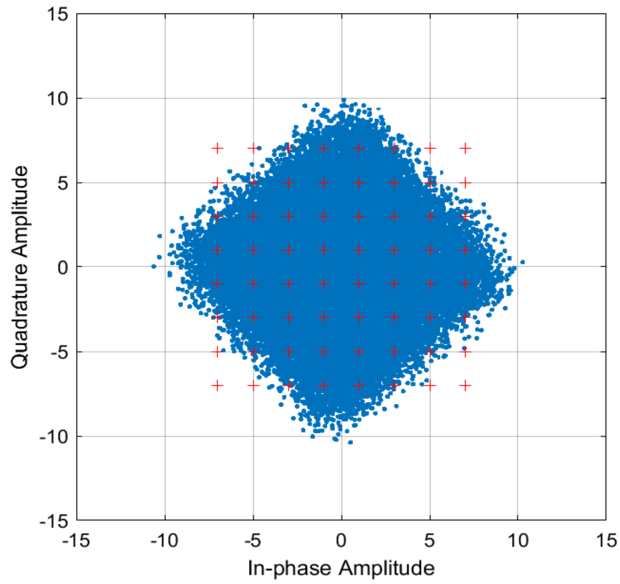


Рисунок 3. Оцінка впливу багатопроменевості каналу на якість прийнятого сигналу.

Зокрема модель представлено у тривимірному просторі, враховуючи розташування та розміри будівель. Дані про будівлі, які були імпортовані у середовище Site Viewer із файлу OpenStreetMap (.osm), що відповідає району Гонконгу. Файл був завантажений з https://www.openstreetmap.org, який забезпечує доступ до картографічних даних із краудсорсингу по всьому світу. Передавач та приймач розміщуються у місті, а трасування променів використовується для побудови кількох шляхів розповсюдження. Результати трасування променів використовуються для визначення моделі каналу (рис.2).

Варто зазначити, що тривимірна модель міської забудови використовувалась лише для моделі поширення радіохвиль, з метою врахування загасання сигналу при розрахунку співвідношення SINR. Для цього використано модель трасування променів, яка враховує особливості поширення сигналу з урахуванням багатократного відбиття від будівель, і як наслідок, втрати потужності сигналу.

Шляхи розповсюдження обчислюються за допомогою аналізу трасування променів, який враховує будівлі та геометрію місцевості навколо ділянок для визначення шляхів прямої видимості або відбитих шляхів. Матеріали для будівель та ландшафту за замовчуванням бетонні. Кожен шлях може бути обраний для перегляду відповідних характеристик поширення, включаючи потужність, зміна фази, відстань і кути виходу і приходу.

Для оцінки впливу багатопроменевості каналу на якість прийнятого сигналу було застосовано передачу кадру сигналів 64-QAM (рис.3). Як можна бачити, прийнятий сигнал сильно спотворений через значні міжсимвольні завади (ISI), викликані багатопроменевим каналом в широкосмуговому сигналі.

3.3. Моделі режимів діаграмоутворення

Як відомо, радіоприйом визначається відношенням сигнал/(шум + внутрішньосистемні завади) SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio). Припустимо, пристрої системи радіодоступу (СРД) працюють у загальному радіоканалі, здійснюють передавання інформації без централізованого керування та характеризуються апріорною невизначеністю територіального розподілу, тоді SINR є складно прогнозованою величиною. Невизначеність територіального розподілу полягає в тому, що розташування пристрою, що передає корисний сигнал SOI, та розташування інших передавальних пристроїв, які щодо приймаючого пристрою в момент прийому є джерелами внутрішньосистемних завад SNOI, наперед невідоме. Якщо пристрої СРД працюють із спрямованими антенами, то SINR визначатиметься кутовим розташуванням пристроїв. Для оцінки SINR в режимі діаграмоутворення (ДУ) необхідно врахувати не тільки втрати розповсюдження радіохвиль і потужність передавачів, але й коефіцієнт підсилення (КП), тому у запропонованому методі враховуються режими роботи пристроїв з ДУ з метою оцінки КП сигналу SOI і КП внутрішньосистемних завад SNOI [23]. При використанні в СРД антенних решіток (АР), КП корисного сигналу та сигналів внутрішньосистемних завад визначаються режимами встановлення зв'язку та будуть різними під час ведення зв'язку. Встановлення зв'язку в СРД з ДУ полягає у попередньому виявленні передавальним пристроєм приймаючого сигналу та навпаки. Процедура виявлення включає визначення напрямку приходу сигналу під час роботи на прийом та формування ДН під час роботи на передачу та прийом. Якщо процедура виявлення передує сеансу зв'язку, такий режим роботи назвемо діаграмотворення з попереднім виявленням DB (Beamforming with Discovery). Якщо ведення зв'язку здійснюється без попереднього виявлення, такий режим роботи називається випадковим діаграмоутворенням RB (Random Beamforming). Оцінку КП корисного сигналу SOI та сигналів внутрішньосистемних завад SNOI виконують для двох сеансів ведення зв'язку: а) спрямованої передачі та спрямованого прийому DD (Directional Transmission – Directional Reception); б) спрямованої передачі та ненаправленого прийому DO (Directional Transmission - Omni directional Reception) [23].

3.4. Метод та алгоритми підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС

Задачею запропонованого інноваційного рішення є підвищення енергозбереження в Cub-SAT НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль шляхом реалізації функції одночасної передачі інформації та потужності в системах низькоорбітального супутникового зв’язку IoT з архітектурою розподіленого супутника [24-26] на базі нейронних мереж та машинного навчання для надання якісних послуг в інтегрованих мережах зв’язку 5G / IoT.

Поставлена задача вирішується тим, що відомий спосіб прийому

багатопроменевого сигналу [27], який пропонується застосувати для забезпечення функціонування Cub-SATів НОСС на базі РС, і у якому при прийомі періодично визначають число і часові затримки компонент багатопроменевого сигналу, для чого визначають часову область багатопроменевості, проводять пошук сигналу в області багатопроменевості і визначають оцінку пошуку числа і часових затримок компонент багатопроменевого сигналу, формують оновлені число і часові затримки компонент багатопроменевого сигналу, знаходять часові затримки компонент багатопроменевого сигналу поточного періоду, постійно уточнюючи оновлені часові затримки компонент багатопроменевого сигналу, використовуючи ці часові затримки, формують м'які рішення про інформаційні символи, **додатково включає** визначення стану запропонованої системи низькоорбітального супутникового зв'язку IoT з архітектурою розподіленого супутника; режим роботи діаграмотворення з попереднім виявленням передавальним пристроєм приймаючого сигналу та навпаки, формування на основі алгоритмів кластеризації стільників з компонентів багатопроменевого сигналу, які відображають розподілення потужностей та затримок компонентів на кластерах; проведення оцінки потужностей сукупності компонент у відповідних кластерах; визначення кластерів, які будуть використовуватися для формування м'яких рішень та збору енергії; проведення розподілення сукупності компонент багатопроменевого сигналу визначених кластерів на групи для формування м'яких рішень та збору енергії; моніторинг роботи висхідного та низхідного каналів передавання, приймання і обробки багатопроменевих сигналів, збір даних та тренування нейронної мережі за допомогою SDN контролера, вузла контролю та зберігання даних та інфраструктури нейронної мережі [28].

Інфраструктура нейронної мережі має програмні модулі роботи алгоритмів ML (нейронної мережі) на SDN контролері; тренування нейронної мережі; навчання та оптимізації нейронної мережі.

Загальну величину компонент багатопроменевого сигналу вибирають рівну максимальній кількості багатопроменевих компонентів, які використовуються для демодуляції даних та збору енергії.

Потужність компонентів багатопроменевого сигналу у Cub-SATі оцінюють по вирішальній функції операції пошуку для заданих дискретних часових затримок області багатопроменевості, підсумовуючи квадрати синфазної і квадратурної частин відповідних комплексних кореляційних відгуків пілот сигналу.

Для визначення станів запропонованої системи прийому сигналів Cub-SATів застосовується кластерний підхід із використанням ML алгоритмів k-means (k – середніх) та c-means (c – середніх) [29]. Даний підхід дозволяє визначити на базі певного проміжку часу необхідні стани запропонованого пристрою або появу нових станів. Крім того, дозволяє врахувати більшу кількість функціональних технічних параметрів із мінімальною зміною програмного забезпечення.

Для прийому багатопроменевого сигналу у Cub-SATі використовується алгоритм формування м'яких рішень способу, який додатково включає відбір компонент багатопроменевого сигналу відповідного кластеру, ранжування компонент

багатопроменевого сигналу, оцінку відношення потужності компоненти до суми потужностей всіх попередніх ранжованих компонент, порівняння величини її потужності з заданим порогом, у разі перевищення заданого порога компоненту відбирають для формування м'яких рішень, у противному -- відбирають для схеми збору енергії.

На рис. 4. зображена структурна схема реалізації запропонованого способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС при багатопроменевому поширенню радіохвиль. На ній:

1. Блок пошуку.
2. Блок оновлення компонент багатопроменевого сигналу.
3. Блок управління.
4. Блок формування м'яких рішень.
5. SDN контролер.
6. Вузол контролю та зберігання даних.
7. Блок формування кластерів.
8. Приймальній пристрій для збору енергії.
9. Хмара зберігання нейронних мереж.
10. ML алгоритми моніторингу та оптимізації роботи.
11. ML алгоритми навчання та тренування.
12. Хмара зберігання статистичних параметрів FE.

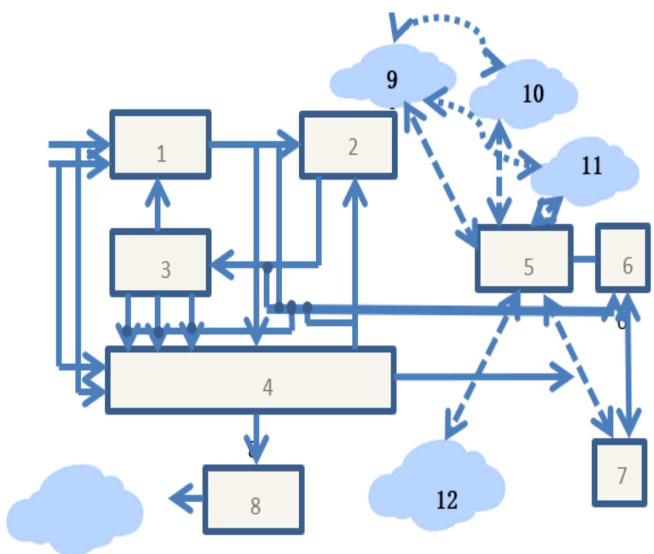


Рисунок 4. Структурна схема реалізації запропонованого способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС.

На фіг. 5 зображена блок-схема алгоритму відстежування стану запропонованого способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль на базі штучного інтелекту для збору і

перетренування відповідних нейронних мереж.

На ній:

1. Штатний режим роботи пристроїв моніторингу і оптимізації роботи із використанням алгоритмів на базі штучного інтелекту (ПМОР) висхідного та низхідного каналів (передавального та приймального терміналу джерела інформації; передавання, прийому і обробки сигналів Cub-SAT; передавального та приймального терміналу кореспондента).
2. Моніторинг стану роботи блоків ПМОР на базі алгоритмів k-means та c-means.
3. Операція «Нормальний стан роботи ПМОР?».
4. Операція « Відомий стан роботи ПМОР?».
5. Збір даних для тренування.
6. Агрегування і надсилання даних до SDN контролера.
7. Формування алгоритму розподілення часу передачі з протоколами збору енергії БПЕ, ОБПІМ, багатопроменевості та ДУ.
8. Перетренування нейронних мереж блоку 7 (рис.1).
9. Оновлення нейронних мереж.

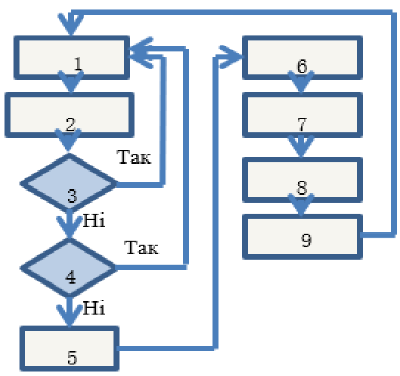


Рисунок 5. Блок-схема алгоритму відстежування стану запропонованого способу підвищення енергозбереження для збору і перетренування відповідних нейронних мереж.

Запропонований спосіб підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль, відрізняється від відомих рішень тим, що додатково включає:

- попереднє визначення стану запропонованої системи підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС;
- режим роботи діаграмотворення з попереднім виявленням DB (Beamforming with Discovery): процедуру виявлення передавальним пристроєм приймаючого сигналу та навпаки, на висхідній та низхідній ділянках радіоліній (відповідно, наземний термінал джерела інформації - Cub-SAT; Cub-SAT - наземний термінал кореспондента), визначення напрямку приходу сигналу під час роботи на прийом та формування діаграми направлення під час роботи на передачу та прийом.
- після проведення пошуку сигналу в області багатопроменевості формують на

основі алгоритмів кластеризації стільники з компонентів багатопроменевого сигналу, які відображають розподілення потужностей та затримок компонентів на кластерах;

- після формування стільників проводять оцінку потужностей сукупності компонент у відповідних кластерах і визначають кластери, які будуть використовувати для формування м'яких рішень та збору енергії;
- після визначення кластерів формують оновлене число і часові затримки компонент багатопроменевого сигналу і проводять розподілення сукупності компонент багатопроменевого сигналу визначених кластерів на групи для формування м'яких рішень для отримання інформаційної складової та збору енергії відповідно.

Для проведення моніторингу роботи запропонованого рішення підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС при багатопроменевому поширенню радіохвиль проводять збір даних та тренування нейронної мережі за допомогою SDN контролера, вузла контролю та зберігання даних і інфраструктури нейронної мережі; тренування нейронної мережі; навчання та оптимізації нейронної мережі.

Для реалізації запропонованого способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль використовується пристрій, який представлено на рис.4.

На рівні управління пристрій для реалізації способу підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль має SDN контролер 5, який має з'єднання з вузлом контролю та зберігання даних 6, хмарою 9 зберігання нейронних мереж, хмарою 12 зберігання статистичних параметрів FE, хмарою ML 10 алгоритмів моніторингу роботи, хмарою ML 11 алгоритмів навчання та тренування.

Пристрій для реалізації запропонованого способу підвищення енергозбереження в Cub-SAT НОСС при багатопроменевому поширенню радіохвиль працює наступним чином.

Вхідний комплексний сигнал запропонованого пристрою, що містить синфазну і квадратурну складову, поступає на перший та другій входи блоку пошуку 1 і на перший і другій входи блоку формування м'яких рішень 4.

У блоці пошуку 1 періодично аналізують область багатопроменевості. Оцінка часових затримок компонент багатопроменевого сигналу і відповідні їм значення вирішальної функції пошуку надходять на перший вхід блоку оновлення компонент сигналу 2, четвертий вхід блоку формування м'яких рішень 4 і перший вхід вузла контролю та зберігання даних 6 пристрою. Область багатопроменевості для поточного періоду пошуку визначають в блоці 3 управління по сигналу, який надходить на його вхід з виходу блоку оновлення компонент сигналу 2 і на перший вхід вузла контролю та зберігання даних 6 пристрою. Інформація про розмір та часове положення області багатопроменеві з першого виходу управління блоку управління надходить на третій вхід блоку пошуку 1 і на перший вхід вузла контролю та зберігання даних 6 пристрою.

У блоці оновлення компонент сигналу 2 формують оновлене число та часові затримки компонент багатопроменевого сигналу. Оновлені часові затримки

компонент багатопроменевого сигналу поточного періоду з блоку 2 надходять на вхід блоку керування 3, з другого виходу якого на третій вхід блоку формування м'яких рішень 4 надходить сукупність оновлених часових затримок компонент багатопроменевого сигналу попереднього періоду та перший вхід вузла контролю та зберігання даних 6 пристрою. З другого виходу блоку формування м'яких рішень 4 уточнені часові затримки і відповідні кореляційні відгуки пілот символів оновлених компонент багатопроменевого сигналу надходять на другий вхід блоку оновлення сигналу 2.

У блоці формування м'яких рішень 4 здійснюють зважене підсумовування сформованих кореляційних відгуків інформаційних символів уточнених компонент багатопроменевого сигналу, отримуючи м'які об'єднані рішення про інформаційні символи, які надходять на перший інформаційний вихід пристрою і на перший вхід приймача збору енергії.

У блоці формування кластерів 7 здійснюється на основі алгоритмів кластеризації формування стільників для компонентів багатопроменевого сигналу, що відображають розподілення потужностей та затримок компонентів на кластери, для забезпечення постійного моніторингу і оцінки динаміки процесів як збору енергії та і обробки інформації по тому самому прийнятому радіочастотному сигналу.

Авторами даного рішення пропонується використання інтелектуальних алгоритмів на базі тренованих моделей штучного інтелекту.

Робота цих алгоритмів зосереджена на управлінні використання енергетики радіоліній висхідного та низхідного радіоканалів і як результат оптимізації використання ресурсів їх енергетичного потенціалу. Проте такі алгоритми мають мати відповідну інфраструктуру для збору даних, тренування, тестування і оновлення відповідних тренованих моделей. Функціональні метрики розробленої системи оцінки роботи перетренованої нейронної мережі повинні бути звичні функціональні параметри даного рішення: співвідношення сигнал/шум, затримки компонентів багатопроменевого сигналу, ефективність використання спектральних ресурсів каналів зв'язку та інше. Якщо перетренована модель для певного алгоритму призвела до погіршення функціональних параметрів то дана модель повинна бути повернена на дотренування або має бути видалена із модуля зберігання даних. Для того щоб інтелектуальні алгоритми управління видавали правильний результат необхідно зібрати достатній набір даних. Під достатнім набором даних розуміється оптимальна кількість даних при якій тренування моделей вважається завершеним і не спостерігається так званий процес оверфітингу.

Для збору функціональних даних використовується SDN контролер 5, який безпосередньо здійснює процес збору відповідних даних із блоків запропонованого пристрою для реалізації способу підвищення енергозбереження в бездротових системах. Кожен блок запропонованої системи (блоки 1, 2, 3, 4 див. рис. 4) є джерелом інформації для ML алгоритмів. Основна обробка даних перед тренуванням нейронних мереж 11 здійснюється на SDN контролері 5. Всі зібрані функціональні параметри, які необхідні для тренування нейронних мереж зберігаються у хмарі FE 12. Доступ до

цих параметрів мають лише інтелектуальні алгоритми на SDN контролері. Якщо відбулася зміна стану запропонованої системи підвищення енергозбереження у Cub-SATах НОСС при багатопроменевому поширенню радіохвиль, яка вимагає перетренування відповідних моделей блока 7, то відповідні алгоритми здійснюють відповідну процедуру перетренування їх на базі нових параметрів FE. Після цього відбувається заміна відповідних натренованих моделей у хмарі. Коли з'явилась нова версія моделі для блоку 7, блок 7 завантажує відповідну оновлену версію моделі.

Важливою складовою інтелектуальних алгоритмів управління є збір безпосередньо даних для навчання. Однією із особливістю використання даних алгоритмів у телекомунікаційних радіомережах є змінність станів в системі підвищення енергозбереження в Cub-SAT НОСС на базі РС, а також появу нових і зникнення поточних станів, що вимагає додаткового збору даних і перетренування нейронних мереж.

Розроблений алгоритм збору даних (див. рис. 5) передбачає відстежування стану блоків системи підвищення енергозбереження в Cub-SAT НОСС на базі РС при багатопроменевому поширенню радіохвиль для раціонального збору даних із використанням зміни значень, як метрик евклідових відстаней, так і метрик функціональних технічних параметрів, по відношенню до кількості кластерів. Новизна даного підходу полягає у відмінності від класичної реалізації тим, що введені метрики співвідношення сигнал/шум та затримка компонентів багатопроменевого сигналу, замість метрики Евклідової відстані, що дає змогу враховувати просторові характеристики поширення сигналу в процесі само оптимізації розробленої приймальної структури та відповідно підвищити її технічну ефективність. Таким чином алгоритм, блок схема якого представлена на рис. 5, відстежує стан кожного блоку запропонованого пристрою для реалізації способу підвищення енергозбереження в Cub-SAT НОСС на базі РС.

Подальша перспектива використання даного рішення вбачається в наступному. Запропонована авторська розробка дозволяє вирішити ряд науково-технічних задач для створення нових методів та алгоритмів інтеграції технології бездротової передачі інформації та енергії у мережну інфраструктуру НОСС на базі РС для забезпечення процесу енергозбереження її засобів функціонування при використанні терагерцового діапазонів хвиль [3].

Серед науково-практичних завдань, які необхідно ще вирішувати для цього, основною є дослідження впливу запропонованої уніфікованої моделі збирання енергії на вимоги до надійності та затримки для майбутніх додатків IoT у реальному часі при застосуванні у мережній інфраструктурі НОСС на базі РС. Запропонована уніфікована модель збирання енергії є унікальною та перевершує порівняно з аналогічними схемами, відомі в літературі. Однак, щоб задовольнити потреби програм реального часу в мережах 5G, цю удосконалену модель збирання енергії необхідно додатково досліджувати на предмет таких параметрів продуктивності, як надійність та затримка. Канальне кодування може використовуватися в Cub-SATах НОСС підвищення надійності. Однак необхідно додатково вивчити розподіл ресурсів

та оптимізацію, щоб мінімізувати компроміси між параметрами системи.

4. Висновки

1. Запропоновано метод передачі інформації на базі інтеграції технології бездротової передачі інформації та енергії у інфраструктуру супутникової мережі для забезпечення енергозбереження малих супутників.

2. Результати, отримані в рамках роботи, забезпечують необхідну основу для майбутніх досліджень, згаданих у цій статті, які в кінцевому підсумку можуть призвести до практичної реалізації НОСС на базі РС з використанням малих супутників типу Cub-SAT для передачі інформації та енергії для майбутніх поколінь зв'язку 5G/6G [3].

Посилання

1) Капштик С.В., Наритник Т.М., Сайко В.Г. Перспективні середньоорбітальні та низькоорбітальні системи супутникового зв’язку // Цифрові технології, 2018. - № 23. - С. 39…58.
2) Патент на корисну модель 134409 Україна, H 04 B 7/185 Система низькоорбітального супутникового зв’язку/ Наритник Т.М., Сайко В.Г., Авдєєнко Г.Л., Казіміренко В.Я., Сарапулов С.В; заявл.29.12. 2018; опубл. 10.05.2019 // Бюл. № 9.
3) Сайко В.Г. Мережі мобільного зв’язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія – К.: ТОВ «Про формат», 2021. – 200 с.
4) Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности // Международный научно-исследовательский журнал ▪ - 2018.- № 12 (78) ▪ Часть 2 ▪ Декабрь. – с. 84-91.
5) Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Toliupa, S. Increasing Noise Immunity between LEO Satellite Radio Channels // 2020 Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020. pp. 442–446. Scopus
6) Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with RF energy harvesting / X. Lu [и др.] // IEEE Wireless Communications. — 2014. — т. 21, № 3. — с. 102—110.
7) Hu Z., Wei N., Zhang Z. Optimal Resource Allocation for Harvested Energy Maximization in Wideband Cognitive Radio Network with SWIPT // IEEE Access. — 2017.
8) Т. Д. Поннимбадуге Перера, Д. Н. К. Джаякоди, С. К. Шарма, С. Чатцинотас и Дж. Ли. Одновременная беспроводная передача информации и мощности (SWIPT): последние достижения и будущие проблемы, в обзорах и учебных пособиях IEEE Communications , vol. 20, нет. 1, стр. 264-302, первый квартал 2018 г., doi: 10.1109/COMST. 2017.2783901.
9) Harvest-Then-Cooperate: Wireless-Powered Cooperative Communications / H. Chen [и

др.] // IEEE Trans. Signal Processing. — 2015. — т. 63, № 7. — pp. 1700—1711.
10) Kansal A., Srivastava M. An environmental energy harvesting framework for sensor networks // Low Power Electronics and Design, 2003. ISLPED’03. Proceedings of the 2003 International Symposium on, IEEE, 2003. P. 481-486.
11) Rahimi M., Shah H., Sukhatme G., Heideman J., Estrin D. Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network // Proceedings. ICRA’03. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Vol. 1. P. 19-24.
12) Фокин, Г.А. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана / Г. А. Фокин, А.Г. Владыко // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6. № 4. – С. 43–57.
13) Фокин, Г.А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности / Г. А. Фокин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14. № 12. – С. 4–17.
14) Matolak, D. W. Air–Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems Part I: Methods, Measurements, and Models for Over-Water Settings / D. W. Matolak, R. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Jan. – 2017. – V. 66, №. 1. – P. 26-44.
15) Sun, R. Air–Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems Part II: Hilly and Mountainous Settings / R. Sun, D. W. Matolak // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – March. – 2017. – V. 66, №. 3. – P. 1913-1925.
16) Matolak, D. W. Air–Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems Part III: The Suburban and Near-Urban Environments / D. W. Matolak, R. Sun // IEEE Transactions on Ve- hicular Technology. – Aug. – 2017. – V. 66, №. 8. – P. 6607-6618.
17) Sun, R. Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems–Part IV: Airframe Shadowing / R. Sun, D. W. Matolak, W. Rayess // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Sept. – 2017. – V. 66, №. 9. – P. 7643-7652.
18) Matolak, D. W. Air-Ground Channels & Models: Comprehensive Review and Considerations for Unmanned Aircraft Systems / D. W. Matolak // Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT. – March. – 2012. – P. 3-10.
19) Sun, R. Dual-Band Non-Stationary Channel Modeling for the Air-Ground Channel / R. Sun. – The- sis for: Ph.D. – University of South Carolina. – 2015.
20) Matolak, D. W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The near-ur- ban environment / D. W. Matolak, R. Sun // Military Communications Conference, MILCOM 2015- 2015 IEEE. – IEEE, 2015. – P. 1656-1660.
21) Matolak, D. W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The hilly sub- urban environment / D. W. Matolak, R. Sun // Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th. – IEEE, 2014. – P. 1-5.
22) Sun, R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The mountainous en- vironment / R. Sun, D. W. Matolak // Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015
23) Бакулин М.Г. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244с.

24) Патент України на корисну модель №142478 Україна. Система низькоорбітального супутникового зв'язку із міжсупутниковими каналами зв'язку терагерцового діапазону / Сайко В.Г., Домрачев В.М., Наритник Т.М., Сивкова Н.М./ заявл. 21.11.2019; опубл. 10.06.2020 р. // Бюл. № 11.
25) Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Lukova-Chuiko, N. Terahertz Range Interconnecting Line for LEO-System // Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020. pp. 425–429. Scopus
26) Saiko, V., Domrachev, V., Gololobov, D.. Improving the noise immunity of the inter-satellite communication line of the LEO-system with the architecture of the 'distributed satellite' // 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings. pp. 133–136. Scopus
27) Патент RU № 2251802. Способ приема многолучевых сигналов, способ поиска и способ формирования мягких решений при приеме многолучевого сигнала и устройства их реализации/ Гармонов А.В., Манелис В.Б. Дата публикации патента 10.05.2005. Бюл. № 13. Прототип.
28) Тархов Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. Справочник. – М.: Радиотехника, 2014. – 352 с.
29) Скиена С. Наука о данных: учебный курс. Пер. с анг. В.А. Коваленко. Киев.: Диалектика, 2020. – 544 с.
30) Saiko V, Narytnyk T. High-reliability 5G / IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering: collective monograph / Saiko V., Narytnyk T. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2022. pp..477-497. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1 URL: https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/